

УДК 614.846

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ СВЯЗКЕ

**А.П. РУСТАМОВ; канд. техн. наук, доц. О.О. СМИЛОВЕНКО**  
(Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск)

На основании анализа факторов, влияющих на режущую способность сегментного алмазного круга, определены технологические и эксплуатационные параметры, управление которыми позволит увеличить режущую способность инструмента, а следовательно, повысить интенсивность проведения аварийно-спасательных работ, связанных с разборкой завалов, образовавшихся в результате обрушений зданий и сооружений. Исследованы механические характеристики связки, модифицированной ультрадисперсными алмазами. Установлено, что твердость модифицированных связок выше, а коэффициент трения ниже, чем у чистых связок. Проведены испытания режущих кругов с сегментами, изготовленными на модифицированной связке. Сетка эксперимента построена на основе равномерно распределенных последовательностей (ЛП-последовательностей). Разработана математическая модель процесса резания при выполнении аварийно-спасательных работ, которая позволит путем вычислительного эксперимента прогнозировать режущую способность алмазного инструмента, а значит сроки выполнения работ.

**Ключевые слова:** аварийно-спасательные работы, интенсивность их проведения, режущая способность инструмента, сегментный алмазный круг.

Чрезвычайные ситуации (ЧС) природного и техногенного характера приводят к разрушению зданий и сооружений, что влечет за собой необходимость выполнения работ по разборке завалов. Наибольшую сложность представляет ликвидация завалов, образованных при разрушении современных крупнопанельных зданий, так как при этом получается хаотическое нагромождение крупных железобетонных глыб, соединенных между собой металлической арматурой. Эти завалы разбирают поэлементно с помощью кранов, лебедок и тракторов при отделении частей здания бетоноломами, автогенными аппаратами или бензорезами. Под бензорезом подразумевается автономная компактная пила, которая снабжена вращающимся диском с режущей кромкой. Успешность выполнения аварийно-спасательных работ (АСР) определяется проведением мероприятий по ликвидации ЧС в короткие сроки, что обеспечивается применением эффективных способов и технологий, механизацией этих работ, привлечением современных машин и оборудования [1].

**Основная часть.** При использовании бензорезов эффективность проведения АСР зависит от скорости резания и стойкости режущего круга. Необходимо максимально интенсифицировать процесс резания. Однако имеется ряд факторов, которые не позволяют существенно повысить режимы резания. Альтернативой этой проблеме выступают другие факторы, управляя которыми, можно повысить скорость резания.

Алмазные круги с прерывистым режущим слоем (сегментные) получили наибольшее распространение и изготавливаются диаметром от 200 до 3500 мм с толщиной корпуса 1,5...15 мм. Такие круги состоят из корпуса (несущей основы инструмента), в качестве которого используется обычно закаленная инструментальная сталь; на периферии его имеются радиальные пазы и закрепляются алмазосодержащие сегменты, изготовленные преимущественно методами порошковой металлургии.

Проведен системный анализ факторов, влияющих на работоспособность алмазного инструмента. Все влияющие факторы разделены на три группы [2]:

- *конструктивные*, учитывающие форму и размеры режущего круга и сегментов;
- *технологические*, связанные с материалом сегмента и способом его изготовления;
- *эксплуатационные* – параметры привода, сообщаемого вращение режущему кругу; характеристики обрабатываемого материала; объективные условия работы и субъективный фактор – квалификация работающего с инструментом.

Диаметр и толщина диска – корпуса режущего круга непосредственно влияют на скорость и силу резания, так как линейная скорость резания на периферии диска прямо пропорциональна его радиусу, а от ширины пропила, то есть от толщины диска и сегмента, зависит сила резания как сила сопротивления обрабатываемого материала.

С точки зрения прочности инструмента важными конструктивными параметрами являются толщина корпуса, форма и размеры пазов. Другие конструктивные параметры, влияющие на напряженное состояние в наиболее опасных местах отрезных кругов (высота алмазоносного слоя, определяющая при прочих равных условиях срок службы круга, ширина и длина сегментов, расстояния между ними), также во многом определяют работоспособность инструмента и экономичность его применения.

Анализ факторов, влияющих на эффективность проведения аварийно-спасательных работ, схематично представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. – Факторы, влияющие на эффективность проведения АСР

Эффективность работы режущих кругов во многом зависит от характеристики режущего алмаза – концентрации алмазов и их зернистости. Прочность алмазных зерен, оцениваемая разрушающей нагрузкой, – один из основных параметров, определяющих работоспособность инструмента.

Работоспособность алмазных инструментов в значительной степени определяется прочностью алмазных зерен и надежностью их закрепления в матрице (связке). Исследования особенностей разрушения алмазного слоя позволяют сделать вывод о том, что его структура и свойства, а также процессы, происходящие в нем при работе инструмента, в значительной степени определяют ресурс инструмента. Опыт эксплуатации серийно производимого алмазного инструмента на металлической связке свидетельствует о том, что большей частью алмазные зерна, выпавшие из связки, не выработали свой ресурс. Поэтому управление процессами, протекающими в зоне контакта алмазов и связки при изготовлении инструмента, с целью получить заданные структуру и свойства адгезионной зоны может служить основой повышения надежности закрепления зерен и, соответственно, работоспособности инструмента в целом.

В процессе резания алмазное зерно подвергается воздействию статических и динамических сил, циклическому нагреву и охлаждению, которые влияют на его прочность. Прочность режущего сегмента зависит от свойств связки, удерживающей зерна, так как она является своеобразным демпфером, воспринимающим усилие: при низкой твердости связки зерна углубляются, не производя резания, а при высокой твердости происходит интенсивное разрушение зерна. Если связка изнашивается быстрее алмаза, он будет выпадать, если медленнее – эффективность обработки снижается вследствие полировки связки. Таким образом, учитывая рассмотренные виды изнашивания и разрушения алмаза, можно сделать вывод о том, что для повышения производительности алмазных отрезных кругов необходимо создать оптимальную связку, которая увеличит срок службы инструмента и уменьшит его стоимость [3].

Алмазные частицы в металлической связке можно закрепить методом литья алмазосодержащих сплавов; зачеканиванием и шаржированием зерен в металлический корпус, изготовленный из пластичных материалов; методами порошковой металлургии и электрохимического осаждения. Причем более

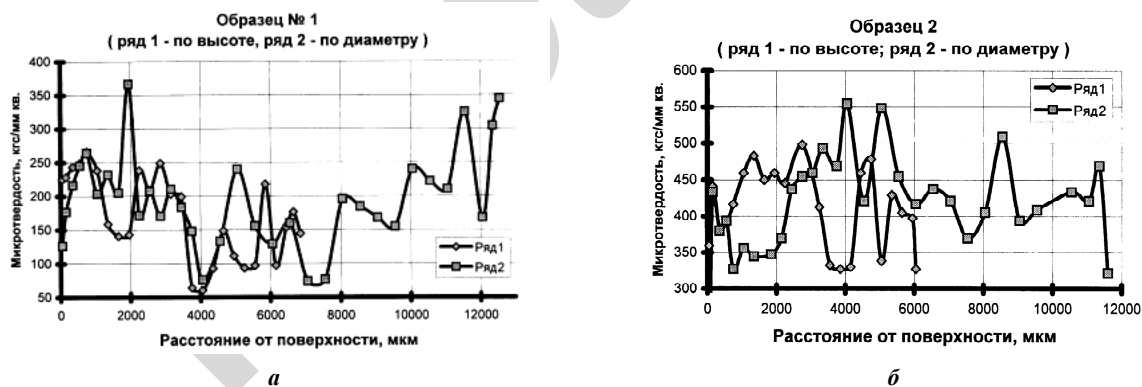
распространен инструмент, изготовленный методами порошковой металлургии. Суть метода порошковой металлургии заключается в том, что смесь металлических порошков с другими компонентами подвергают уплотнению и последующей термической обработке (спеканию) при температуре ниже температуры плавления хотя бы одного из компонентов. В результате процессов диффузии, расплавления легкоплавких компонентов с образованием растворов спрессованное тело после термической обработки приобретает высокую прочность, электропроводность и другие физико-механические свойства, приближающиеся к свойствам, аналогичным по составу материалов, полученных литьем. Использование в качестве исходных материалов порошков позволяет формировать в пресс-форме заготовки точные по форме и размерам, что сводит к минимуму объем механической обработки.

Таким образом, эффективность применения алмазных отрезных кругов зависит от многих факторов: конструктивных особенностей инструмента, режимов резания, характеристики алмазоносного слоя, условий эксплуатации. При выборе рациональных параметров алмазного режущего инструмента следует исходить из комплексной оценки каждого из них, так как все они взаимосвязаны и обеспечивают необходимый эффект только в результате правильно выбранного сочетания.

Металлические связки представляют собой многокомпонентные порошковые смеси, основными составляющими которых являются Co, Cu, W, Al, легированные соединениями Ti, B и другими элементами. Разработка новых металлических связок с улучшенными эксплуатационными свойствами является актуальной проблемой. Практически ставится задача создания нового класса инструментальных материалов. Большие возможности в этом плане открывает технология получения металлических связок, модифицированных ультрадисперсными алмазами (УДА). Введение таких материалов в металлические связки изменяет процесс компактирования и спекания последних, их физико-механические и эксплуатационные свойства [4].

Методом электроконтактного спекания изготовлены экспериментальные образцы режущих элементов отрезного алмазного инструмента на модифицированных металлических связках и предназначены для исследования их физико-механических и триботехнических свойств. Половина образцов каждой связки имеют форму цилиндра с размерами:  $\varnothing 12$  мм,  $h - 10$  мм; другая половина имеет форму прямого параллелепипеда с размерами  $7 \times 8 \times 24$  мм.

Проведено исследование дюрометрических свойств металлических связок. Микротвердость измерялась на микротвердомере «Micromet-II» фирмы «Buehler» (Швейцария) с нагрузкой 100 г. Графики изменения микротвердости приведены на рисунках (для образца связки № 1 – 2, а; для образца связки № 2 – 2, б), причем измерение микротвердости осуществлялось как по диаметру образца, так и по его высоте.



а – на основе меди; б – на основе кобальта

Рисунок 2. – Микротвердость образца

Проведены также триботехнические испытания металлических связок, модифицированных УДА. Рассмотрим механизм взаимодействия алмазного зерна и модифицированной связки с обрабатываемым материалом. Процесс изнашивания модифицированного алмазоносного слоя состоит из нескольких взаимосвязанных и одновременно протекающих фаз: абразивного износа и механического удаления (вырывания) зерен, а также абразивного истирания связки. Вырывание зерен из связки происходит в результате воздействия на них тангенциальных составляющих силы резания, а абразивное истирание связки – вследствие воздействия на нее мелкодисперсных продуктов разрушения обрабатываемого материала.

Если связка имеет износостойкость ниже оптимальной, алмазные зерна из нее преждевременно выпадают, в итоге используются нерационально. Если износостойкость связки выше оптимальной, на вершинах режущих алмазных зерен образуются площадки износа, следовательно, для внедрения

алмазных зерен в обрабатываемый материал требуются дополнительные силы, которые приводят к возникновению больших усилий резания и разрушению алмазоносного слоя.

Триботехнические свойства металлических связок изучались при помощи специальной установки УТИМ-2. Триботехническим испытаниям были подвергнуты металлические связки, модифицированные ультрадисперсным алмазным порошком соответствующей концентрации. В процессе испытаний производились измерения коэффициента трения, температуры фрикционного разогрева и суммарного износа образцов. Получены определенные закономерности износа связок в зависимости от степени легирования их порошком ультрадисперсного алмаза. Наиболее наглядно кинетику износа отражает изменение коэффициента трения на определенном пути и за определенное время (2 ч) при одинаковой нагрузке, равной 10 Н.

Так, для связки М2-01 наиболее оптимальной является 0,5% концентрация УДА, при которой коэффициент трения изменяется в пределах 0,2...0,25 за 4 часа. В то время как коэффициент трения «чистой связки» находился на уровне 1,3 в течение 2-х часов.

Микрорентгеноспектральные исследования экспериментальных образцов режущих элементов показали высокую гомогенность спеков, повышение их микротвердости. Равномерное распределение модифицирующих наноалмазных частиц позволяет выровнять удельное электросопротивление спекаемого слоя, что приводит к получению гомогенной структуры спека по всему объему. Установлено, что оптимальной концентрацией легирования металлических связок порошком УДА является диапазон 0,5...0,75%. Повышение твердости модифицированных связок снижает интенсивность их изнашивания и повышает прочность алмазоудержания, о чем свидетельствует снижение удельного расхода алмазного сырья на 10%. Однако увеличение концентрации УДА до 1% и выше приводит к резкому повышению коэффициента трения и температуры в зоне обработки, увеличивает твердость связки, снижает ее пластичность, затрудняет процесс вскрытия новых режущих зерен, вызывая тем самым ухудшение эксплуатационных свойств алмазного инструмента. Следует отметить, что повышение значений механических характеристик связок режущих сегментов позволяет только прогнозировать улучшение эксплуатационных качеств круга в целом при работе без охлаждения (как это часто происходит при АСР) и с увеличенными скоростями резания и подачи.

Таким образом, требуется провести испытания экспериментальных образцов сегментов на модифицированной связке в реальных условиях эксплуатации. Результаты этих испытаний могут быть использованы для построения математической модели процесса резания.

Для проведения испытаний изготовлены отрезные сегментные круги диаметром 300 и толщиной 4 мм, на каждый из которых припаяны режущие сегменты на медной связке с различной зернистостью алмаза и концентрацией УДА в связке. В качестве привода режущего круга использовали бензорез отечественного производства, стоящий на вооружении подразделений МЧС. Бензорез был установлен стационарно и перемещался поступательно вместе с вращающимся кругом при помощи специального приводного устройства для обеспечения регламентированной подачи. Вскрытие алмазных зерен производилось при работе бензорезом вручную, после чего измеряли размер сегментов перед началом испытаний. Скорость продольной подачи и глубину резания контролировали при помощи линейки и секундомера. Износ сегментов круга, равный уменьшению высоты их алмазоносного слоя, измеряли индикатором часового типа. Испытание круга проводили до тех пор, пока его износ не достигал  $\frac{1}{4}$  высоты алмазоносного слоя. Износ сегментов круга рассчитывали как среднее арифметическое результатов четырех измерений изменения высоты сегментов, равноудаленных друг от друга на периферии круга.

В качестве критерия работоспособности принята режущая способность, характеризуемая удельной производительностью резания. Удельную производительность определяли по формуле

$$П = \frac{L \cdot h}{t},$$

где  $L$  – общая длина реза, см;  $h$  – среднее значение глубины реза, см;  $t$  – время резания, мин.

Основной проблемой, возникающей при проведении экспериментальных исследований [5], является построение оптимальных измерительных сетей – пространственного расположения точек измерения. При планировании оптимальных измерительных сетей обычно исходят из некоторого обобщенного критерия, учитывающего множество таких факторов, как стоимость измерений, точность описания различных составляющих поля и т.д. Разработанные различными авторами процедуры поиска рациональной сети обычно исходят либо из прямоугольной, либо из ромбической сетки расположения точек съема информации. Представляется эффективным такое расположение этих точек, чтобы их координаты формировались по алгоритмам планируемого ЛП-поиска (ППП-поиска), достаточно просто реализуемым на ЭВМ [6]. Эффективность данного подхода объясняется, с одной стороны, упорядоченным целенаправленным характером проведения экспериментов во всей области измерений благодаря одновременной реализации в нем идеи дискретного квазиравномерного по вероятности зондирования многомерного пространства

варьируемых параметров и методологии планируемого математического эксперимента, с другой – тем, что использование планирования экспериментов обеспечивает широкое применение различных эвристических процедур исследования и анализа.

Сочетание таких идей в алгоритме ЛПП-поиска позволяет, во-первых, осуществить глобальный квазиравномерный просмотр заданной области варьируемых параметров, во-вторых, применить многие формальные оценки из математической статистики. Существенное уменьшение числа экспериментов при сохранении доверия к их результатам состоит в специальной организации исследования и разработке алгоритмов обработки информации, учитывающих конечный объем выборок.

Направленный ЛПП-поиск позволяет выполнить полнофакторный эксперимент по точкам, равномерно распределенным в объеме гиперпараллелепипеда, не оставляя пустых, неизученных пространств, как это бывает при рандомизации пространства методом Монте-Карло. ЛПП-поиск предполагает организацию области исследований в виде многомерного куба или параллелепипеда, гранями которого являются диапазоны изменений параметров. При этом происходит формализация этих диапазонов, и размерность параметра не имеет значения. Каждая точка такого многомерного пространства определяется сочетанием параметров и представляет собой одно из состояний исследуемой системы, характеризующее определенные значения параметров и критериев.

Назначены три изменяемых параметра: один технологический – концентрация модификатора в связке; два эксплуатационных – скорость резания и подача.

Область исследований представлена многомерным пространством параметров (табл. 1), исследуемые точки и результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 1. – Пространство параметров

Управляемые параметры процесса резания (наименование и размерность)	Границы возможных изменений параметров	
	нижняя граница	верхняя граница
Концентрация УДА, добавляемого в связку, %	0,5	1,5
Окружная скорость круга, м/с	20,0	40,0
Подача, см/мин	20,0	30,0

Таблица 2. – Экспериментальные значения (сетка эксперимента) и результаты измерений

Номер эксперимента	Концентрация УДА (параметр $P_1$ )	Окружная скорость (параметр $P_2$ )	Подача (параметр $P_3$ )	Удельная производительность резания
1	1,0	30	250	490
2	1,25	25	275	430
3	0,75	35	225	580
4	1,125	37,5	287,5	460
5	0,625	27,5	237,5	600
6	0,875	32,5	212,5	560
7	1,375	22,5	262,5	540
8	1,5	40	231,25	410

По результатам эксперимента построена математическая модель в виде уравнения регрессии, которая связывает между собой режимные эксплуатационные параметры и критерий «удельная производительность», характеризующий режущую способность инструмента:

$$K = 344,662P_1 + 0,0961P_2 - 46,393P_3 - 2,172P_1^2 + 0,00619P_2^2 + 15,863P_3^2,$$

где  $P_1$  – параметр «концентрация УДА»;  $P_2$  – параметр «окружная скорость»;  $P_3$  – параметр «подача».

**Заключение.** Установлено, что модифицирование ультрадисперсным алмазом позволяет изменять механические характеристики связки режущих сегментов; твердость связки повышается, а коэффициент трения снижается, что подтверждено экспериментально. Металлографические исследования модифицированной связки показали повышение плотности и снижение пористости по сравнению с «чистой» связкой.

Проведены испытания режущих кругов с сегментами, изготовленными на модифицированной связке с различной концентрацией ультрадисперсного алмаза при различных эксплуатационных режимах; сетка эксперимента для трех изменяемых параметров построена на основании равномерно распределенных ЛПП-последовательностей; в качестве критерия выбрана удельная производительность алмазного круга.

По результатам эксперимента построена *математическая модель, связывающая между собой технологические* (концентрация ультрадисперсного алмаза в связке) и *эксплуатационные* (скорость резания, подача) *параметры с интенсивностью* (удельная производительность) *резания*.

Определена *оптимальная концентрация модификатора в связке* (0,5...0,75%).

В дальнейшем вычислительный эксперимент с использованием математической модели (решение обратной задачи) позволит установить *рациональные режимы резания при заданной удельной производительности и стойкости круга*.

По результатам проведенных исследований можно сделать *вывод*, что повышение удельной производительности резания способствует проведению аварийно-спасательных работ в более сжатые сроки, а повышение стойкости инструмента позволит реже производить его замену, что также сократит сроки выполнения АСР и снизит их стоимостные показатели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голов, Г.И. Демонтажные работы при реконструкции зданий / Г.И. Голов. – М. : Стройиздат, 1990. – 143 с.
2. Рустамов, А.П. Факторы, влияющие на работоспособность режущего инструмента при проведении аварийно-спасательных работ / А.П. Рустамов, О.О. Смиловенко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. тр. XII междунар. науч.-техн. конф., 2015. – Курск. – С. 164–170.
3. Лоладзе, Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М. : Машиностроение, 1967. – 113 с.
4. Основы проектирования и технологического изготовления абразивного алмазного инструмента / В.Н. Бакуль [и др.]. – М. : Машиностроение, 1975.
5. Статников, И.Н. Планирование вычислительного эксперимента в задачах многокритериального моделирования динамических систем / И.Н. Статников, Г.И. Фирсов // Компьютерное моделирование. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – С. 104–112.
6. Статников, И.Н. Построение аппроксимационных моделей при проведении имитационных экспериментов / И.Н. Статников, Г.И. Фирсов // Автоматизация научных исследований в области машиноведения. – М. : Наука, 1983. – С. 19–24.

Поступила 16.01.2017

#### THE EXPERIMENTAL MODEL OF THE CUTTING PROCESS IN THE CONDUCT OF RESCUE WORK IN THE DIAMOND CIRCLES ON A MODIFIED BUNDLE

A. RUSTAMOV, O. SMILOVENKO

*Based on the analysis of the factors influencing cutting capacity of a segment diamond wheel technological and operational parameters are determined, control of which will allow to increase cutting capacity of the tool and consequently to increase intensity of carrying out the wrecking connected to disassembling of the blockages formed as a result of building collapses and constructions. Mechanical characteristics of the sheaf modified by ultradispersible diamonds are probed. It is set that hardness of the modified sheaves is higher, and the friction coefficient is lower, than at clean ligaments. Tests of the cutting circles with the segments made on the modified sheaf are carried out. The grid of an experiment is constructed on the basis of uniformly the distributed sequences (LP-sequence). The mathematical model of process of cutting in case of execution of a wrecking which will allow to predict cutting capacity of a diamond tool and consequently periods of performance of work by a computing experiment is developed.*

**Keywords:** rescue work, the intensity of the event, the cutting ability of the tool, segment diamond wheel.